

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ З'ЄДНАНЬ ЗВАРНИХ ТРУБ**

Савкин Святослав Віталійович, аспірант

Національної металургійної академії України

Savkin Svyatoslav, Ph.D. student, Department of Technological Design

National Metallurgical Academy of Ukraine, bat_2008@ukr.net

У даній роботі розроблено математичну модель діагностики залишкових напружень в зварювальних швах труб великих діаметрів, а також проводилися вимірювання зразків на наявність в них залишкових напружень з використанням методу магнітної пам'яті металу.

Ключові слова: напруження, зварювання, індукція, різницеві рівняння.

Виробництво сталевих труб великого діаметра засноване на двох різновидах виробничих процесів: прокаті і зварювальному виробництві. У зв'язку з інтенсивним розвитком обчислювальної техніки стало можливим виконання будь-яких розрахунків, в тому числі і визначення залишкових зварювальних напружень. Виникнення зварювальних залишкових напружень і деформацій було описано в роботах багатьох вчених і дослідників [1-3]. Методи використання комп'ютерних технологій при визначенні напружень та деформацій при зварюванні описані в роботах [4,5].

Кожен з відомих методів зниження залишкових напружень має більш-менш обмежену область раціонального застосування, тому виникає необхідність як удосконалення існуючих, так і пошуку принципово нових способів обробки зварних з'єднань з метою зняття залишкових напруг, а також діагностування їх геометрії і структурного стану.

Остаточне формування зварювальних на-напружень відбувається після завершення процесу зварювання і звільнення звареної конструкції від закріплень. Разом з цим відбувається перерозподіл на-пружено-деформованого стану конструкції, виникають залишкові деформації і внаслідок цього перерозподіляються і внутрішня напруга конструкції, при цьому найбільша концентрація напружень і деформацій виникає в зоні зварного шва і в зоні сплаву.

У даній дослідницькій роботі проводилися вимірювання зразків на наявність в них залишкових напружень за допомогою ІКН - 1М - 4 - приладу вимірювання концентрації напруги моделі. ІКН - система вимірювання, реєстрації та обробки даних діагностики напружено-деформованого стану обладнання та конструкцій з використанням методу магнітної пам'яті металу.

Прилади типу ІКН є унікальними засобами вимірювань, винятковими як у функціональному призначенні (визначення зон концентрації напружень - основних джерел розвитку пошкоджень обладнання), так і в конструктивних специфічних особливостях, які помітно виділяють їх серед відомих магнітометрів.

Вихідний сигнал вимірювальних каналів після дискретизації подається на пристрій безперервного диференціювання. Передавальна функція безперервної диференціовальної ланки:

$$W_{\delta}(p) = k_0 p \quad (1)$$

де k_0 – коефіцієнт пропорційності; p - параметр фільтра.
Вхід і вихід пристрою пов'язані рівнянням:

$$y(t) = k_0 \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

де x - складова магнітного поля; t - час.

Визначимо дискретну передавальну функцію диференціовальної ланки. У загальному випадку Z – перетворення від передавальної функції (1) не існує, тому дискретну передавальну функцію цифрової диференціовальної ланки одержуємо з рівняння (2). Нехай на вхід ланки надходить безперервний сигнал $x(t)$. Замінімо безперервний сигнал $x(t)$ сигналом, який описується гратчастою функцією наступного вигляду:

$$x[i] = x(t) \Big|_{t=iT_0}, \quad (3)$$

де i – ціле число, T_0 - період дискретизації.

За гратчастої функції (3) побудуємо інтерполяційний поліном Лагранжа:

$$L_n(t) = \sum_{i=0}^n \Pi_{n+1}(t) x[i] / (t - iT_0) \Pi_{n-1}^i(iT_0) \quad (4)$$

$$\text{де } \Pi_{n+1}(t) = (t - 0T_0)(t - 1T_0)(t - 2T_0) \dots (t - nT_0) \text{ тоді } L_n(iT_0) = x[i]$$

$$\begin{aligned} \text{Вважаючи } (t - 0T_0)/T_0 = q, \quad \text{одержуємо} \\ \Pi_{n+1}(t) = T_0^{n+1} \cdot q \cdot (q-1) \dots (q-n) = T_0^{n+1} q^{n+1} \quad \text{та} \\ \Pi_{n+1}(iT_0) = (iT_0 - 0T_0)(iT_0 - 1T_0) \dots (iT_0 - nT_0) = (-1)^{n-i} T_0^n i!(n-i)! \end{aligned}$$

Отже, для полінома Лагранжа справедлива рівність:

$$L_n(t) = \sum_{i=0}^n (-1)^{n-i} x[i] / [i!(n-i)!] \cdot q^{n+1} / (q-i) \quad (5)$$

$$\text{Враховуючи, що } \frac{dt}{dq} = T_0, \text{ одержуємо}$$

$$x(t) \approx L_n(t) = \frac{1}{T_0} \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^{n-i} x[i]}{i!(n-i)!} \cdot \frac{d}{dq} \left\{ \frac{q^{n+1}}{q-i} \right\} \quad (6)$$

Для оцінки похибки метода диференціювання $r_n(t) = x'(t) - L'_n(t)$ скористаємося формулою похибки:

$$R_n[iT_0] = (-1)^{n-i} T_0^n i!(n-i)! x^{n+1}(\xi) / [(n+1)!], \quad (7)$$

де $x^{n+1}(\xi)$ – похідна $(n+1)$ -го порядку від вхідного сигналу між точками $0T_0, 1T_0, \dots, nT_0$.

З рівняння (7) можна вивести різницеві рівняння для програмної реалізації алгоритму цифрового диференціювання при різній кількості точок вхідного сигналу, що використовуються в циклі обчислення значень похідної. Отримаємо різницеві рівняння для програмної реалізації алгоритму цифрового диференціювання і визначимо їх похибки диференціювання для різного числа точок.

$$\text{Для } n=1 \text{ маємо } l_1(t) = \sum_{i=0}^1 (-1)^{1-i} x[i] / [i!(1-i)!] \cdot q^2 / (q-i) = -x[0](q-1) + x[1]q$$

Враховуючи, що $\frac{dt}{dq} = T_0$, одержуємо $x(t) \approx L_1(t) = \{x[1] - x[0]\} / T_0$, або в загальному вигляді:

$$x'(t) = \{x[i] - x[i-1]\} / T_0 \quad (8)$$

Похибка диференціювання для різницевого рівняння (8) на основі виразу (7) буде мати вигляд:

$$k_1'(iT_0) = T_0 x''(\xi) / 2.$$

Застосовуючи Z – перетворення до різницевого рівняння (8), одержуємо $x'[z] = k_0 x(z)(1 - z^{-1}) / T_0$. Тоді дискретна передавальна функція буде мати вигляд:

$$D(z) = k_0(1 - z^{-1}) / T = b_0(1 - z^{-1}), \quad (9)$$

де $b_0 = k_0 / T$. На рис. 1 зображена її структурна схема алгоритму програмної реалізації.

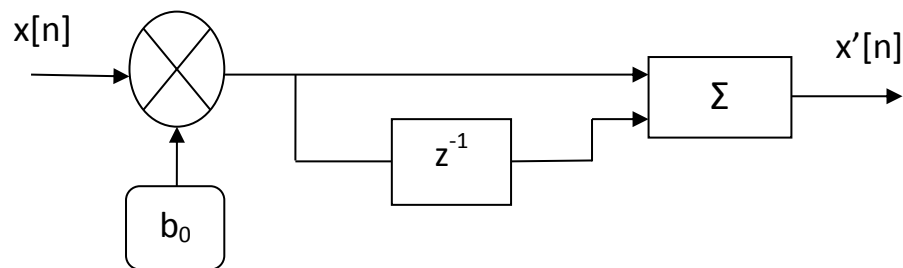


Рисунок – Структурна схема програмної реалізації дискретних передавальних функцій

Сигнал $x'(t)$ буде змінюватися за законом:

$$\begin{cases} x'[0] = 0 \\ x'[1] = k_0 x[1] / T_0 \\ x'[2] = k_0 \{x[2] - x[1]\} / T_0 \\ x[n] = k_0 \{x\} \end{cases}$$

Враховуючи затримку τ , яка вноситься приладом диференціювання при реалізації алгоритму, одержуємо:

$$D(z) = b_0(1 - z^{-1})e^{-\tau}, \text{ а при } \tau = T_0$$

$$D(z) = k_0(1 - z^{-1})z^{-1}.$$

Частотні характеристики приладу диференціювання:

$$W(e^{j\omega T_0}) = b_0(1 - \cos \omega T_0 + j \sin \omega T_0) \quad (10)$$

Модулем (10) є вираз:

$$|W(e^{j\omega T_0})| = b_0 \sqrt{(1 - \cos \omega T_0)^2 + \sin^2 \omega T_0} \quad (11)$$

Якщо враховувати запізнення на $\tau = T_0$, то

$$W(e^{j\omega T_0}) = b_0[(\cos \omega T_0 - \cos 2\omega T_0) - j(\sin \omega T_0 - \sin 2\omega T_0)]$$

Якщо розрахунок диференціувального приладу провести для $n = 2$, то маємо:

$$L_2(t) = \sum_{i=0}^2 (-1)^{2-i} x[i] / [i!(2-i)!] \cdot q^3 / (q-i)$$

$$x'(t) = \frac{1}{T_0} \left\{ \frac{1}{2} x[0](2q-3) - x[1](2q-2) + \frac{1}{2} x[2](2q-1) \right\}, \quad (12)$$

Зокрема для похідних $x[iT_0]$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) маємо:

$$\begin{cases} x'[0] = \frac{1}{2T_0} (-3x[0] + 4x[1] - x[2]) \\ x'[1] = \frac{1}{2T_0} (-3x[0] + x[2]) \\ x'[2] = \frac{1}{2T_0} (x[0] - 4x[1] + 3x[2]) \end{cases} \quad (13)$$

В загальному вигляді різницеві рівняння (13) можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} x'[i] = k_0(-3[i] + 4x[i+1] - x[i+2]) / 2T \\ x''[i] = k_0(-x[i-1] + x[i+1]) / 2T \\ x'''[i] = k_0(x[i-2] - 4x[i-1] + 3x[i]) / 2T \end{cases} \quad (14)$$

З виразу (14) можна одержувати передавальні функції алгоритмів диференціювання:

$$\begin{cases} D'[z] = x'(z) / x(z) = k_0(-3 + 4z^{+1} - z^{+2}) / 2T \\ D''[z] = x''(z) / x(z) = k_0(-z^{-1} + z^1) / 2T \\ D'''[z] = x'''(z) / x(z) = k_0(z^{-2} - 4z^{-1} + 3z) / 2T \end{cases}$$

Для програмної реалізації алгоритмів цифрового диференціювання в реальному масштабі часу необхідно використовувати $D''[z]$, тому що вона використовує попередні значення гратчастої функції вхідного сигналу в моменти часу $(i-2, (i-1))$, а не в наступні $(i+2, (i+1))$, як в $D'[z]$.

В дискретну передавальну функцію $D'''[z]$ введемо додаткові запізнення на один такт, так як в реальному масштабі часу в момент iT_0 немає значення вхідного сигналу $x[i+1]$ в момент часу $(i+1)T_0$.

$$D'''[z] = \frac{k_0}{2T} (1 - z^{-2})$$

Тоді $D'''[z]$ приймає вигляд

Основним прийомом поділу сигналів служить дворазове швидке перетворення Фур'є (пряме і зворотне) і перетворення Гільберта. Спектр вхідного сигналу, перекладеного в цифровий код, зрізається обмежувачем,

потім виконується пряме швидке перетворення Фур'є. Подальші перетворення йдуть по двох каналах (паралельних), в одному з них виробляється зворотне перетворення Фур'є (інверсія), в іншому сигнал попередньо піддається перетворенню Гільберта (зрушення на 90° гармонійної функції). Ставлення вихідних напруг каналів дає шукану величину.

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Сигнали з вимірювальних перетворювачів після попередньої обробки, яка полягає в перетворенні аналогового сигналу в цифровий, надходять на смуговий фільтр, призначення якого відрізати низкочастотну і високочастотну складові.

2. Параметри фільтра визначаються за методикою, яка заснована на трьох послідовних вибірках сигналу, які здійснюються в межах частини періоду сигналу, що скорочує час вимірювання. Автоматичний вибір інтервалу вибірок визначається діапазоном частот сигналу.

3. Вибірки можуть бути взяті в будь-який момент часу, а послідовні вимірювання можуть дещо відрізнятися один від одного через відмінності моментів вибірки. Чисельними експериментами встановлено, що якщо $x_2 < 0.005 (x_{\max} - x_{\min})$, то проводиться нова серія вибірок. Якщо обрана максимальна затримка, наприклад, $0.03 T$ (T – період сигналу), тоді вибірки обрані занадто рідко.

4. З іншого боку, якщо вибірки занадто близькі один до одного, то різниця між ними складає близько крока квантування АЦП, що є причиною флуктуацій на виході. Якщо мінімальна затримка складає 6% періоду, то інтервал вибірок необхідно збільшити. Якщо величина x_2 менша за 5% діапазона сигналу, то беруться три інші вибірки.

Запропонована методика виміру залишкових напружень має досить широку область раціонального застосування, а тому може застосовуватися для інших технічних об'єктів, в яких використовуються зварювальні технології.

Список використаної літератури

1. Антонов, А.А. Стеклов, О.И. Исследование технологических остаточных напряжений в сварных соединениях магистральных трубопроводах // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 3. – С.13-19.

2. Анучкин, М.П. Горицкий, В.Н. Мироненко, Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. – М. : Недра, 1986. – 231 с.

3. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Л.: ЛКИ. 1980. 331 с.

4. Федосеева Е.М., Ольшанская Т.В., Игнатов М.Н. Моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода. Тяжелое машиностроение. 2011. № 3, с. 31-37.

5. Michaleris P., Dantzig J., Tortorelli D. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures // Welding Journal. 1999. Vol. 78(11). pp. 361-366.